اثر دمای ریختن بر برخی مشخصات مکانیکی و دوام جداول بتنی پرسی خشک★

(یادداشت پژوهشی)

هرمز فامیلی[۱] محسن تدین[۲] محمدرضا خوش‌سیما[۳]

چکیده *شرایط آب و هوایی گرم یا سرد به شکل‌های مختلفی بر کیفیت بتن تأثیر می‌گذارند که یکی از آن‌ها افزایش یا کاهش دمای اولیه‌ی بتن می‌باشد. در این تحقیق تأثیر دمای اولیه‌ی بتن بر کیفیت آن در جداول بتنی ساخته شده به‌روش پرسی (فشاری) خشک و با استفاده از سیمان پرتلند، بررسی گردید. بتن‌هایی با طرح اختلاط یکسان و با دماهای اولیه ۱۷، ۲۵، ۲۹ و ۳۹ درجه‌ی سانتی‌گراد ساخته‌شدند و تا زمان انجام آزمایش، در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند. سپس در سنین مختلف آزمایش‌هایی بر روی بتن انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که دمای بتن در هنگام ریختن، پارامتر تأثیرگذاری بر ویژگی‌های مقاومتی و دوامی بتن می‌باشد. در دمای اولیه‌ی ۳۹ درجه سانتی‌گراد به‌طور قابل ملاحظه‌ای کیفیت بتن کاهش یافت. در محدوده‌ی دمایی این تحقیق، دمای اولیه‌ی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد منجر به به‌ترین کیفیت در بتن گردید. در سنین ۷ و ۴۲ روز، بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاترین مقاومت فشاری را کسب نمود و کم‌ترین میزان جذب آب نیز در بتن با دمای اولیه ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد مشاهده شد. بیش‌ترین مقدار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در سنین بالا متعلق به بتن با دمای اولیه‌ی ۱۷ درجه‌ی سانتی‌گراد بود.*

واژه‌های کلیدی دمای اولیه، بتن بدون اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی، جذب آب، عمق نفوذ آب، مقاومت خمشی، جدول بتنی پرسی خشک.

The Effect of Casting Temperature on some Mechanical Properties and Durability of Dry Pressed Precast Concrete Kerbs

H. Famili M. Tadayon M. R. Khoshsima

Abstract *Hot or cold weather condition affects the quality of the concrete in different ways, which one of them is increase or decrease in the initial temperature of the concrete. In this study, the impact of the initial temperature of the concrete on its quality in concrete kerbs made by dry pressing method with Portland cement is examined. Concretes with similar mix designs and initial temperatures of 17, 25, 29, and 39 $^{\circ}C$ were made and cured in the standard laboratory condition. Then, in different ages some tests were carried out on them. The test results showed that the temperature of the concrete during placement is a parameter that affects the strength and durability properties of the concrete. For the initial temperature of 39 $^{\circ}C$, the quality of the concrete had a significant decrease. For the temperature range in this study, the initial temperature of 25 $^{\circ}C$ resulted in the highest quality of the concrete. In the 7 and 42 days of age, the concrete with 25 $^{\circ}C$ initial temperature obtained the highest compressive strength and the lowest water absorption. The highest electrical resistivity in high ages was related to the concrete with 17 $^{\circ}C$ initial temperature.*

Keywords Initial Temperature, No Slump Concrete, Compressive Strength, Electrical Resistivity, Water Absorption, Depth of Penetration of Water, Bending Strength, Dry Pressed Concrete Kerb.

★تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۹/۱۱ می‌باشد.

(۱) استادیار، عضو هیأت علمی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۲) مربی، عضو هیأت علمی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

(۳) نویسنده‌ی مسؤول: کارشناس ارشد عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مقدمه

یکی از روش‌های استفاده از بتن، تولید قطعات به‌روش پیش‌ساخته است و یکی از پرکاربردترین این قطعات، جداول بتنی می‌باشند. روش‌های تولید جداول پیش‌ساخته عبارتند از روش معمولی، روش فشاری خشک و روش فشاری تر. در روش فشاری خشک، بتن با سطح کارایی خیلی سفت تا خیلی خشک که بتنی با اسلامپ صفر می‌باشد، در قالب ریخته و با فشار متراکم می‌شود. یکی از مزایای روش فشاری خشک، سرعت اجرا و خروج قطعه از قالب بلافاصله پس از جای‌دهی و تراکم است که عدم نیاز به تعداد زیادی قالب را به‌دنبال دارد. هم‌چنین نسبت آب به سیمان پایین در بتن‌های مورد استفاده در این روش، بهبود کیفیت بتن را سبب می‌گردد.

دست‌یابی به ویژگی‌های مقاومتی و دوامی مطلوب در قطعات بتنی می‌تواند نتیجه‌ی عوامل مختلفی باشد؛ از جمله مصالح مناسب، طرح اختلاط صحیح و رعایت اصول فنی در ساخت، حمل، جای‌دهی و عمل‌آوری. یکی از مواردی که در شرایط ساخت بتن تأثیرگذار است، شرایط آب و هوایی در هنگام اختلاط و جای‌دهی بتن می‌باشد. شرایط آب و هوایی گرم یا سرد به طرق مختلفی بر کیفیت بتن تأثیر می‌گذارند که یکی از آن‌ها افزایش یا کاهش دمای اولیه‌ی بتن می‌باشد.

تحقیقات مختلفی در سطح دنیا در مورد تأثیر دمای بتن بر کیفیت آن انجام شده است ولی این تحقیقات تأثیر دمای بتن در هنگام ریختن و نیز دمای عمل‌آوری را به‌طور توأم مطالعه نموده‌اند و تا جایی که بررسی‌های محقق نشان می‌دهد، دمای ریختن بتن به‌طور مستقل موضوع پژوهش نبوده است. تأثیر روش تولید فشاری (پرسی) و بتن با اسلامپ صفر نیز زمینه‌ی تازه‌ای برای پژوهش می‌باشد. لذا هدف این تحقیق عبارتست از بررسی اثر دمای ریختن بتن بر کیفیت جداول بتنی تولیدشده به‌روش فشاری خشک و نیز تعیین دمای اولیه‌ای که منجر به به‌ترین کیفیت بتن سخت‌شده می‌گردد.

مبانی نظری و پیشینه‌ی تحقیق

بررسی تأثیر دمای اولیه‌ی ریختن بر کیفیت بتن

مشاهده شده است که افزایش در دمای عمل‌آوری باعث تسریع واکنش‌های شیمیائی هیدراسیون می‌گردد و بنابراین بدون این‌که اثرات نامساعدی بر مقاومت بعدی داشته باشد بر مقاومت اولیه اثر مفید خواهد داشت. گو این‌که ممکن است یک دمای زیادتر طی درجا ریختن و گیرش، باعث مقاومت اولیه‌ی خیلی بیش‌تری گردد ولی امکان دارد به‌طور نامطلوبی بر مقاومت از ۷ روز به بعد اثر بگذارد. توجیه این موضوع آن است که به نظر می‌رسد هیدراسیون سریع اولیه، تشکیل محصولاتی با ساختمان فیزیکی ضعیف‌تر و احتمالاً تخلخل بیش‌تر بدهد به‌طوری‌که همیشه نسبت زیادی از منافذ پر نشده باقی بمانند [۱].

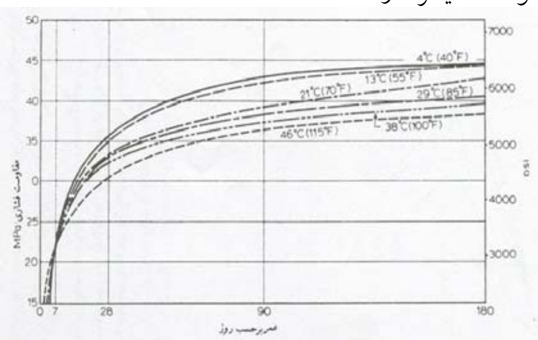
توجیه اثرات نامساعد یک دمای اولیه‌ی زیاد بر مقاومت بعدی بتن توسط وربک و هلموث بسط داده شد. آن‌ها پیشنهاد نمودند که روند سریع هیدراسیون اولیه در دماهای زیاد باعث کند شدن هیدراسیون بعدی می‌گردد و محصولات هیدراسیون در داخل خمیر به‌طور غیریکنواخت پخش می‌شوند. دلیل آن‌ها این بود که با روند سریع هیدراسیون اولیه زمان کافی برای نفوذ محصولات هیدراسیون به دور ذرات سیمان به‌صورت یک‌نواخت رسوب نمودن در فضای بین ذرات (مانند حالت دمای کم‌تر) وجود نخواهد داشت و در نتیجه غلظت زیادی از محصولات هیدراسیون در حوالی ذراتی که هیدراته می‌شوند به‌وجود می‌آید و باعث کند شدن هیدراسیون بعدی می‌گردد و بالاخره بر مقاومت درازمدت اثر نامطلوب خواهد داشت [۱].

به‌علاوه توزیع غیریک‌نواخت محصولات هیدراسیون نیز به خودی خود به‌نحو نامطلوبی بر مقاومت اثر خواهد گذاشت زیرا نسبت ژل به فضا در

بین ذرات، کم‌تر از حالت توزیع یک‌نواخت و با درجه‌ی هیدراسیون یکسان خواهد بود. نقاط موضعی ضعیف‌تر باعث پائین‌آوردن کل مقاومت خمیر می‌گردند [۱].

تأثیر دما طی اولین دو ساعت پس از مخلوط کردن بتن بر توسعه‌ی مقاومت، توسط پرایس بررسی گردیده است. در بررسی او بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۳ ساخته شد. دامنه‌ی دماها بین ٤ تا ٤٦ درجه سانتی‌گراد بود و پس از عمر دو ساعت تمام نمونه‌ها در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند [۲ و ۱]. شکل(۱) نمایانگر نتایج این پژوهش می‌باشد. مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی بتن‌های با دمای اولیه‌ی پایین، بیش‌تر از مقاومت بتن‌های با دمای اولیه‌ی بالا است. با بررسی میکروسکوپی ریز ساختار سیمان هیدراته شده، اکثر محققان این افزایش مقاومت را به یک‌نواخت‌تر بودن خمیر هیدراته شده (به‌خصوص پخش فضاهای ریز در خمیر) نسبت می‌دهند [۲]. آزمایش‌های کلیگر نشان دادند که طی عمر اولیه‌ی بتن، یک دمای بهینه وجود دارد که منتهی به بالاترین مقاومت در عمر معینی می‌گردد [3]. کلیگر هم‌چنین تأثیر دمای اولیه بالای بتن بر مقاومت فشاری را بررسی نمود. در این تحقیق دمای بتن در زمان اختلاط، ریختن و عمل‌آوری ۲۳، ۳۲، ٤۱ و ٤۹ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. پس از ۲۸ روز نمونه‌ها در دمای ۲۳ °C به‌صورت مرطوب عمل‌آوری شدند. نتایج نشان دادند که اگرچه نسبت به دمای ۲۳ °C، دمای بتن بالاتر، مقاومت اولیه‌ی بالاتری ایجاد می‌کند ولی در سنین بعدی مقاومت کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج این تحقیق، تأثیر دما بر مقاومت خمشی بود، مشاهده گردید که این تأثیر همانند تأثیر بر مقاومت فشاری است. در تحقیقی که در سال ۱۹۹٦ توسط بورگ انجام شد [4] بتن‌هایی با دماهای اولیه ۱۰، ۲۳ و ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد ساخته شدند و در همان دمای ریختن، عمل‌آوری شدند.

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که کارایی بتن به‌طور قابل‌توجهی متأثر از دمای ریختن آن است. در دمای ۱۰ °C اسلامپ معادل ۲۱٤ درصد اسلامپ در دمای ۲۳ °C و اسلامپ در دمای ۳۲ °C معادل ۸۰ درصد اسلامپ در دمای ۲۳ °C بود. زمان گیرش نیز به طور مشابه تحت تأثیر دمای ریختن قرار داشت. مقاومت فشاری در روزهای اول برای بتن ساخته‌شده و عمل‌آوری شده در دمای ۳۲°C بالاتر از بتن ۲۳°C بود ولی بعد از ۷ روز نتیجه عکس بود. بتن با دمای ۱۰°C مقاومت فشاری اولیه‌ای پایین‌تر از بتن با دمای ۲۳°C داشت ولی در سنین بالاتر، مقاومت بالاتر و یا برابر با بتن با دمای ۲۳°C بود. نتایج پژوهش بورگ در مورد تأثیر دمای ریختن و عمل‌آوری بر مقاومت فشاری، مشابهت زیادی با گزارش‌های آزمایش‌های انجام‌شده توسط کلیگر دارد.



شکل ۱ اثر دما طی دو ساعت اول پس از مخلوط کردن بتن بر مقاومت [۲ و ۱]

در پژوهشی به‌منظور بررسی جنبه‌های ریزساختاری بتن در ارتباط با دمای اولیه و دمای عمل‌آوری، از تکنیک میکروسکوپ الکترونی استفاده شد [5]. دو نمونه بتن با دمای اولیه‌ی ۲۰°C و ۵۰°C ساخته و در اولین روز پس از ریختن در قالب در دو شرایط عمل‌آوری دماهای ۲۰ °C و ۳۵ °C نگهداری شدند و پس از باز کردن قالب در آب با دمای ۲۰°C تا زمان آزمایش قرار داده شدند. پس از ۲۸ روز نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و کاهش در مقاومت برای نمونه‌های با دمای اولیه‌ی بالاتر و نیز دمای عمل‌آوری بالاتر مشاهده گردید. سطوح شکست

در محل خمیر سیمان و نیز سطح مشترک خمیر سیمان و سنگ‌دانه توسط میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفتند. در بتن با دمای اولیه ۵۰°C و نیز بتن با دمای عمل‌آوری ابتدایی۳۵ °C، توده‌ی خمیر سیمان اغلب بی‌شکل با بافت سطحی ضعیف بود. خلل و فرج و منافذ موئینه نیز در دماهای بالاتر، بیش‌تر مشاهده می‌شدند به‌خصوص در مجاورت سطح مشترک خمیر و سنگ‌دانه. برای دماهای اولیه‌ی بالاتر و دمای عمل‌آوری بالاتر، خمیر سیمان در اطراف سنگ‌دانه متخلخل‌تر بود. در شرایط دمای بالاتر، کریستال‌های هیدروکسید کلسیم به‌طور مشخص در سطح مشترک خمیر و سنگ‌دانه قابل مشاهده بودند.

در تحقیقی که در سال ۱۳۸۷ انجام شده است [٦] تأثیر دمای اولیه‌ی بتن بر برخی پارامترهای مقاومتی و دوامی آن مطالعه گردیده است. بتن‌هایی با طرح اختلاط یکسان و دماهای اولیه‌ی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ساخته و در شرایط استاندارد آزمایشگاهی تا زمان آزمایش نگهداری شدند. در سن ۷ روز مقاومت فشاری بتن با دمای اولیه‌ی ٤۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین مقدار و بتن با دمای اولیه ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کم‌ترین مقدار را داشت ولی در سن ۹۱ روز نتایج عکس بود. در سن ۲۸ روز و ٤۲ روز بیش‌ترین مقاومت فشاری و مقاومت کششی مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. روند تغییرات مقاومت ویژه‌ی الکتریکی از سن ۲۸ تا ۹۱ روز مشابه مقاومت فشاری گزارش گردید. در مورد نتایج آزمایش‌های جذب آب در سن ۲۸ روز، کم‌ترین میزان جذب آب و در مورد آزمایش افت وزنی در اثر یخ زدن و آب شدن در سن ۲۸ روز، کم‌ترین میزان تخریب، مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود.

بتن بدون اسلامپ

روش‌های مختلفی برای تعیین روانی بتن وجود دارند که متداول‌ترین آن‌ها آزمایش اسلامپ است. مقاله‌ی ACI 211.3R (راهنمای طرح اختلاط بتن بدون اسلامپ) بتن‌های با اسلامپ کم‌تر از ۲۵میلی‌متر را بتن بدون اسلامپ در نظر گرفته است و آزمایش‌هایی چون وی بی، ضریب تراکم، تراکم اصلاح شده و میز سقوط تالو را برای تعیین روانی این بتن‌ها مناسب دانسته است [7].

به‌دلیل روانی پایین بتن بدون اسلامپ، روش‌های معمول تهیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی از جمله استانداردهای ASTM C31 (روش استاندارد ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های آزمایشی بتن در کارگاه) و ASTM C192 (روش استاندارد ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌ی آزمایشی بتن در آزمایشگاه) برای این نوع بتن مناسب نیستند. با وجود آن‌که چند روش برای این منظور به کار گرفته شده است ولی تاکنون روش استانداردی از سوی ASTM ارائه نشده است. البته در مورد بتن غلتکی استاندارد ASTM C1176 [8] برای تهیه‌ی آزمونه‌های آزمایشی استوانه‌ای و ASTM C1170 [۹] برای تعیین روانی و وزن مخصوص با استفاده از میز ویبره، وجود دارند.

روش‌های دیگری که برای تهیه‌ی آزمونه‌های آزمایشی از بتن بدون اسلامپ به کار گرفته شده‌اند عبارتند از استفاده از چکش ارتعاشی برقی، روش تراکم پروکتور اصلاح شده (طبق ASTM D 1557) و استفاده از چکش‌های بادی. روش به کار گرفته شده باید تراکمی را ایجاد کند که وزن مخصوص نمونه با وزن مخصوص بتن متراکم شده در محل اجرا قابل مقایسه باشد [10]. استاندارد CSA A23.2-12C (ساخت، عمل‌آوری و آزمایش آزمونه‌های آزمایش فشاری بتن بدون اسلامپ) نیز استفاده از چکش روش پروکتور اصلاح شده و نیز چکش‌های ضربه‌ای برقی را مناسب معرفی کرده است [11].

مصالح مصرفی و برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این پژوهش بتن‌هایی با سطح روانی خیلی خشک با استفاده از سیمان پرتلند و طرح اختلاط یکسان و

دماهای اولیه‌ی ۱۷، ۲۵، ۲۹ و ۳۹ درجه‌ی سانتی‌گراد ساخته و تعدادی نمونه آزمایشگاهی و هم‌چنین جدول کامل از آن‌ها تهیه و در شرایط استاندارد عمل‌آوری شدند. سپس در سنین مختلف آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی، مغزه‌های گرفته شده از جداول و نیز جداول کامل انجام گرفت. این آزمایش‌ها مشخص کننده‌ی جنبه‌های مقاومتی و دوامی بتن می‌باشند.

فعالیت‌های آزمایشگاهی در این پژوهش در چهار مرحله انجام شدند. در مرحله‌ی اول با انجام آزمایش‌هایی بر مصالح مصرفی، ویژگی‌های آن‌ها به‌منظور استفاده در مراحل بعدی شناسایی شد. مرحله‌ی دوم عبارت بود از تهیه‌ی طرح اختلاط بتن مورد استفاده. در مرحله‌ی سوم با توجه به سطح روانی بتن مورد استفاده، پس از بررسی و انتخاب روش تهیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی، بتن با طرح اختلاط مورد نظر و با دماهای اولیه‌ی متفاوت ساخته و تعدادی نمونه‌ی آزمایشگاهی و تعدادی جدول کامل از آن تهیه و در شرایط استاندارد آزمایشگاهی تا زمان آزمایش، عمل‌آوری گردیدند. در مرحله‌ی چهارم که مهم‌ترین و جامع‌ترین بخش تحقیق بود، آزمایش‌های مقاومتی و دوامی بر روی بتن سخت‌شده در سنین مختلف صورت گرفت که عبارت بودند از: آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی، آزمایش مقاومت خمشی، آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار، آزمایش جذب آب اولیه و نهایی و آزمایش جذب آب موئینه.

از آن‌جا که تعیین میزان هوای محبوس در بتن برای بتن‌های غیرخمیری که با روش‌های معمول بتن‌های خمیری قابل متراکم کردن نیستند، مطابق استانداردهای ASTM C173 (روش آزمایش استاندارد تعیین مقدار هوای بتن تازه به روش حجمی) و ASTM C231 (روش آزمایش استاندارد تعیین مقدار هوای بتن تازه به‌روش فشاری) امکان‌پذیر نیست، برای این منظور طبق ASTM C138 (روش آزمایش استاندارد تعیین جرم مخصوص، بازدهی و مقدار هوای بتن تازه) [1] از رابطه‌ی زیر استفاده گردید.

$$\text{درصد هوای بتن} = 100 \times (1 - \frac{\rho_a}{\rho})$$

که در آن ρ_a وزن مخصوص بتن با هوا، ρ وزن مخصوص بتن بدون هوا می‌باشد.

با اندازه‌گیری وزن و حجم جداول و نمونه‌های آزمایشگاهی و استفاده از رابطه‌ی فوق، درصد هوا و وزن مخصوص جداول به‌ترتیب ۷ درصد و ۲۲۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد هوا و وزن مخصوص نمونه های آزمایشگاهی به‌ترتیب ۳/٤ درصد و ۲۳۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه گردید. این اختلاف به‌دلیل تفاوت در نیروی اعمال‌شده برای تراکم نمونه‌ی آزمایشگاهی و جدول می‌باشد.

طرح اختلاط بتن‌های ساخته شده در این تحقیق به‌طور خلاصه در زیر ارائه گردیده است:

سیمان مصرفی سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه‌ی تهران.

حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۹/۵ میلی‌متر.

نسبت آب به سیمان ۰/۳۵.

عیار سیمان ٤۰۰ کیلوگرم در مترمکعب.

آب کل ۱۹۳ کیلوگرم در مترمکعب.

مقدار ماسه خشک ۱۷۷٦ کیلوگرم در مترمکعب.

مقدار هوا ۳/٤ درصد.

وزن یک مترمکعب بتن متراکم تازه ۲۳۷۳ کیلوگرم.

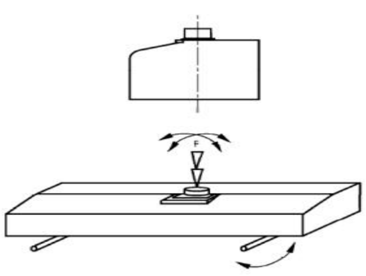
ساخت بتن با استفاده از مخلوط‌کن دارای پره‌ی مارپیچ گردنده انجام شد. برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰×۱۰ سانتی‌متر از چکش روش پروکتور اصلاح‌شده استفاده گردید. این چکش دارای ٤/۵ کیلوگرم وزن و ارتفاع سقوط ٤۵۷ میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق، نمونه‌ها در سه لایه و هر لایه ۲۵ ضربه ساخته شدند. جداول ساخته‌شده دارای طول ۵۰ سانتی‌متر، عرض ۳۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر بودند. نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ریختن بتن در قالب، به‌مدت ۲٤ ساعت در دمای آزمایشگاه (حدود ۲٤ درجه‌ی سانتی‌گراد) نگهداری و پس از

خارج کردن از قالب به اتاق عمل‌آوری منتقل شدند. جداول بتنی نیز در شرایط استاندارد عمل آوری گردیدند. روانی هر یک از بتن‌ها بلافاصله پس از اختلاط بتن با استفاده از آزمون وی‌بی طبق BS EN 12350-3 [13] اندازه‌گیری شد. به‌ازای هر یک از دماهای اولیه و هر سن، برای آزمایش مقاومت فشاری از ۳ آزمونه و برای سایر آزمایش‌ها از ۲ آزمونه استفاده گردید.

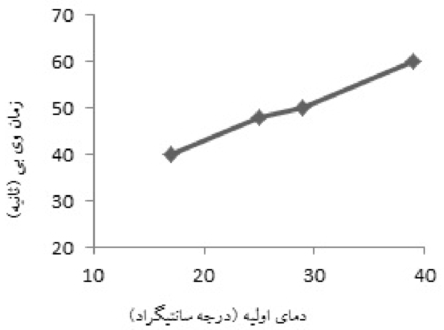
با توجه به این‌که تاکنون روش آزمون استانداردی برای آزمایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی تدوین نشده است، برای انجام این آزمایش از دستورالعمل ارائه‌شده در [١٤] استفاده شد. آزمایش تعیین مقاومت خمشی بر طبق استاندارد BS EN 1340 (جداول بتنی– الزامات و روش‌های آزمون) [15] بر روی جدول کامل انجام گردید. در این آزمایش بار نقطه‌ای بر مرکز جرم جدول که به‌صورت خوابیده و در بیش‌ترین بعد آن روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفته است شکل (۲) بدون اعمال ضربه و با آهنگ افزایش ۰/۰۲ ± ۰/٦ مگاپاسکال بر ثانیه اعمال می‌شود.

نتایج آزمایش‌ها

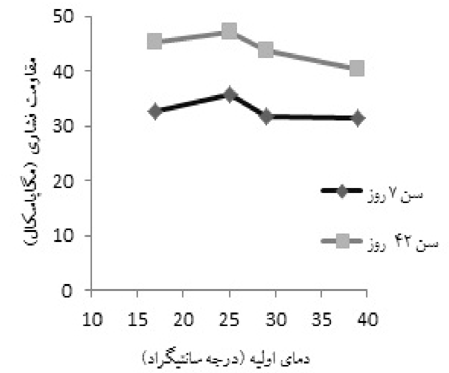
نتایج آزمایش وی‌بی که بر روی بتن تازه انجام شد برای دماهای اولیه‌ی مختلف در شکل (۳) نمایش داده شده است. در مورد نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مشاهده شد که در نمونه‌های آزمایشگاهی در سن ۷ و ٤۲ روز بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C می‌باشد و در این سنین، بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹ °C کمترین مقاومت فشاری را داراست. در مغزه‌های گرفته شده از جداول، مانند نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C و کم‌ترین مقاومت مربوط به بتن با دمای اولیه ۳۹°C بود. این نتایج در شکل‌های (۵ و ٤) نشان داده شده است.



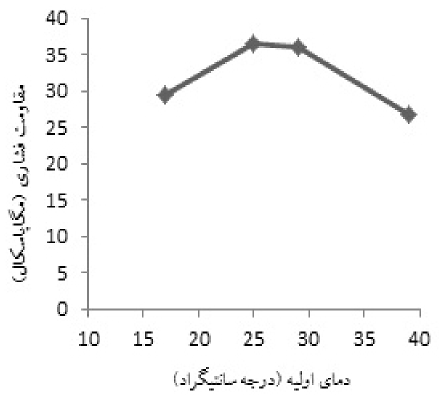
شکل ۲ نحوه‌ی اعمال بار خمشی بر جدول در آزمایش مقاومت خمشی



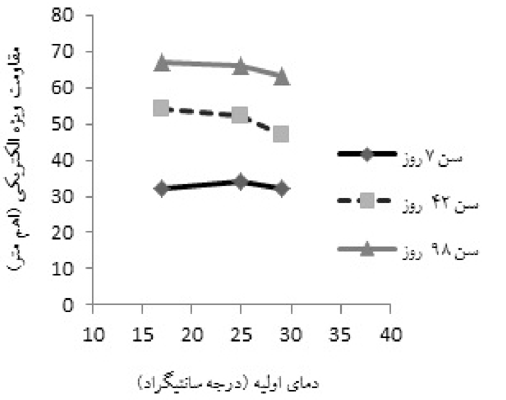
شکل ۳ نتایج آزمایش وی‌بی بر بتن تازه



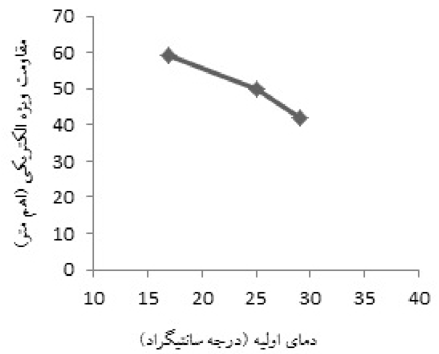
شکل ٤ مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی برای دماهای اولیه‌ی مختلف



شکل ۵ مقاومت فشاری مغزه‌ها در سن ٤۲ روز

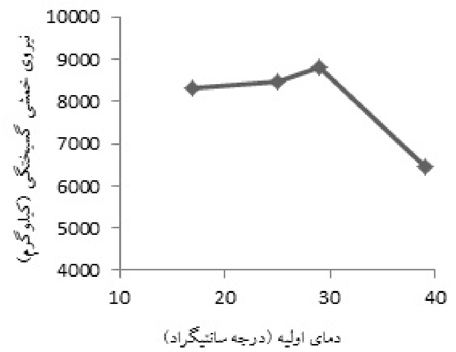


شکل ٦ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های آزمایشگاهی برای دماهای اولیه‌ی مختلف



شکل ۷ مقاومت ویژه الکتریکی مغزه‌ها در سن ٤۲ روزنتایج

آزمایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی که برای محدوده دماهای اولیه‌ی ۱۷ تا ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد نشان داد که کم‌ترین مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در تمام سنین متعلق به بتن با دمای اولیه ۲۹°C و بیش‌ترین مقدار در سن ۷ روز متعلق به بتن با دمای اولیه ۲۵°C و در سن ۴۲ و ۹۸ روز متعلق به بتن با دمای اولیه ۱۷°C می‌باشد. البته در سن ۷ روز نتایج به‌هم نزدیک بودند. روند تغییرات مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در مغزه‌ها مانند نمونه‌های آزمایشگاهی بود (شکل‌های ۷ و ٦). نتایج آزمایش مقاومت خمشی که در سن ٤۲ روز بر روی جدول کامل انجام گرفت، در شکل (۸) نشان داده شده است. بیشترین نیروی گسیختگی و یا به‌عبارتی بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به جدول با دمای اولیه‌ی ۲۹°C و کم‌ترین مقدار مربوط به جدول با دمای اولیه‌ی ۳۹°C بود.



شکل ۸ نیروی خمشی گسیختگی جداول بتنی در سن ٤۲ روز

جدول ۱ نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در سن ٤۲ روز

دمای اولیه (درجه سانتی‌گراد)	۱۷	۲۵	۲۹	۳۹
عمق نفوذ آب تحت فشار (میلی‌متر)	۲۱	۲۱	۲۰	–

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در جدول (۱) نشان داده شده است. در بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹°C، در دقایق اولیه پس از شروع آزمایش، آب به تمام عمق نمونه نفوذ نمود.

کم‌ترین میزان جذب آب نهایی مربوط به بتن با دمای اولیه ۲۵°C و بیش‌ترین مقدار مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹°C بود شکل (۹). روند تغییرات جذب آب برای دماهای اولیه‌ی مختلف، در نمونه‌های آزمایشگاهی با قطعات جدول یکسان بود.

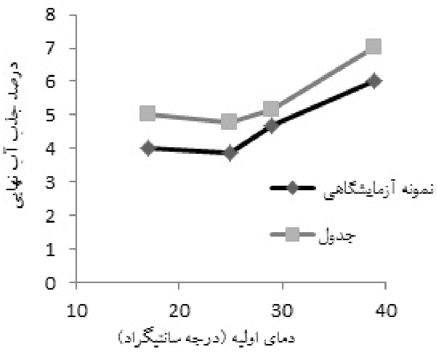
نتایج آزمایش جذب آب اولیه که بر روی نمونه-های آزمایشگاهی و مغزه‌های گرفته شده از جداول انجام شد، همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مانند نتایج آزمایش جذب آب نهایی بود.

کم‌ترین نرخ جذب آب موئینه مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و بیش‌ترین مقدار مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد

بود که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

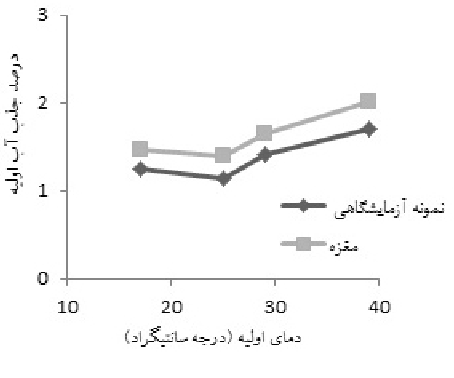
بحث و نتیجه‌گیری

با افزایش دمای اولیه بتن، همان‌طور که انتظار می‌رفت، روانی کاهش یافت که در افزایش زمان وی‌بی قابل مشاهده است. به‌طور تقریبی به‌ازای هر یک درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش در دمای اولیه‌ی بتن، زمان وی‌بی یک ثانیه افزایش یافت.

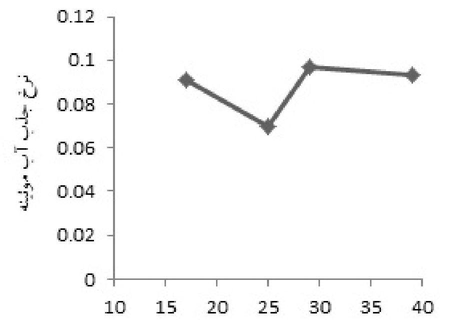


شکل ۹ جذب آب نهایی در سن ٤۲ روز

نتایج آزمایش مقاومت فشاری با گزارش‌های نتایج تحقیقات قبلی که در بخش دوم مقاله به آن‌ها اشاره شد، تفاوت‌ها و مشابهت‌هایی دارد. در تحقیق پرایس [۱] در سن ۷ روز تقریباً همه‌ی مقاومت‌ها یکسان بودند و در سنین بالاتر، بیش‌ترین مقاومت‌ها مربوط به دماهای اولیه‌ی پایین وکم‌ترین مقاومت‌ها در بتن‌های با دمای اولیه بالا گزارش گردید. در تحقیق حاضر، در سن ۷ روز در مقایسه با تحقیق پرایس، مقادیر مقاومت‌ها برای دماهای مختلف، به هم نزدیک نیستند و در سنین بالاتر نیز برخلاف تحقیق پرایس که بیش‌ترین مقاومت را برای دماهای اولیه حدود ۱٥̊C گزارش نموده است، در این تحقیق بتن با دمای اولیه‌ی ۲٥°C بیش‌ترین مقاومت را کسب کرده است. هم‌چنین در هر دو تحقیق، هر چه سن نمونه‌ها بیش‌تر می‌شود، دامنه‌ی تغییرات نتایج افزایش می‌یابد. در تحقیقی که توسط حاجی تقی تهرانی [٦] انجام شده است، در سن ۷ روز بیش‌ترین مقاومت برای بتن با دمای اولیه‌ی بالا (٤۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) و کمترین مقاومت را برای بتن با دمای اولیه پایین (۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) گزارش شده است. در تحقیق وی، در سن ٤۲ روز بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت فشاری به‌ترتیب متعلق به بتن با دمای اولیه ۲۰ و ٤۰ درجه سانتی‌گراد است. لذا نتایج آزمایش مقاومت فشاری در تحقیق حاجی تقی تهرانی با نتایج تحقیق حاضر در سن ۷ روز تفاوت دارد ولی در سن ٤۲ روز به هم نزدیک است.در تحقیق وی، بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در سن ٤۲ روز متعلق به بتن با دمای اولیه ۲۰°C و در تحقیق حاضر متعلق به بتن با دمای اولیه ۱۷ °C می‌باشد که تقریباً مشابه هم می‌باشند.



شکل ۱۰ جذب آب اولیه در سن ٤۲ روز



شکل ۱۱ نرخ جذب آب موئینه در سن ٤۲ روز

البته این امکان وجود دارد که در سنین بالاتر از ٤٢ روز، مقاومت فشاری نمونه های با دمای اولیه ۱۷ درجه سانتی‌گراد از نمونه های با دمای اولیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بیشتر شود که با آزمایش‌ها در سنین بالاتر مشخص می‌گردد.

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت فشاری مغزه‌ها بسیار کم‌تر از مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی بود. علت آن را می‌توان به مقدار هوای غیرعمدی بیش‌تر در جداول نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی نسبت داد که منجر به تخلخل بیش‌تر و در نتیجه مقاومت کمتر می‌گردد. تفاوت زیادی که میان نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی با مغزه‌ها وجود داشت، در مورد نتایج مقاومت ویژه الکتریکی مشاهده نشد.

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار که مشخصه‌ای برای تعیین نفوذپذیری بتن و میزان حفرات قابل نفوذ و مرتبط می‌باشد، برای دماهای ۱۷، ۲۵ و ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد نزدیک به‌هم هستند، لذا به‌نظر می-رسد این آزمایش و یا نحوه‌ی انجام آن، دقت کافی را برای نشان دادن تفاوت نفوذپذیری بتن‌های با دماهای اولیه‌ی متفاوت، نداشته باشد.

با توجه به نتایج آزمایش جذب آب، مشاهده شد که در سن ٤٢ روز، بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C کم‌ترین میزان جذب آب و بیش‌ترین مقاومت فشاری و بتن با دمای اولیه ۳۹°C بیش‌ترین میزان جذب آب و کمترین مقاومت فشاری را هم در نمونه‌های آزمایشگاهی و هم در مغزه‌ها داراست. از آن‌جا که آزمایش جذب آب، میزان تخلخل بتن را نشان می‌دهد، این رابطه‌ی معکوس میان نتایج دو آزمایش را می‌توان با توجه به رابطه‌ی معکوس میان تخلخل و مقاومت فشاری که در قالب رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و نسبت ژل به فضای خالی در ملات سیمان ارائه شده است [۲]، توجیه نمود. درصد جذب آب نمونه‌های آزمایشگاهی کم‌تر از جذب آب جداول بود که می‌تواند مربوط به درصد هوای بیش‌تر جداول نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی باشد.

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها، نتایج حاصل از این تحقیق به‌طور خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

۱- با افزایش دمای ریختن بتن، روانی که در این تحقیق با آزمایش وی‌بی اندازه‌گیری شد کاهش یافت.

۲- در سنین ۷ و ٤٢ روز، بیش‌ترین مقاومت فشاری در بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C و کم‌ترین مقاومت در بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹°C مشاهده گردید.

۳- مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی بیش‌تر از مقاومت مغزه‌های گرفته شده از جداول بود که علت آن را می‌توان به مقدار هوای غیرعمدی محبوس در بتن جداول نسبت داد که بسیار بیش‌تر از هوای غیرعمدی نمونه‌های آزمایشگاهی بود. این اختلاف در میزان هوا، به‌دلیل تفاوت در میزان تراکم بتن در آن‌ها است.

٤- بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به جداول با دمای ریختن ۲۹°C و کم‌ترین مقدار مربوط به دمای ۳۹ °C بود.

۵- در مورد نتایج آزمایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی که بر روی نمونه‌های با دمای اولیه‌ی ۱۷، ۲۵ و ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد، بیش‌ترین مقدار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در سنین ٤٢ و ۹۸ روز متعلق به بتن با دمای اولیه‌ی ۱۷°C و در تمام سنین، کم‌ترین مقدار مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۹°C بود. در سن ۷ روز نتایج این آزمایش برای دماهای اولیه مختلف، به‌هم نزدیک بودند.

٦- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار برای دماهای اولیه‌ی ۱۷، ۲۵ و ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد، به‌هم نزدیک بودند و بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹°C بیش‌ترین عمق نفوذ را دارا بود.

۷- نتایج آزمایش‌ها جذب آب اولیه و جذب آب

نهایی از لحاظ روند تغییرات میزان جذب آب برای دماهای اولیه‌ی مختلف، مشابه هم بودند به‌طوری که بیش‌ترین درصد جذب آب اولیه و نهایی مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۳۹°C و کم‌ترین مقدار مربوط به بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C بود.

۸- نرخ جذب آب موئینه در بتن با دمای اولیه‌ی ۲۵°C کم‌ترین و در بتن با دمای اولیه‌ی ۲۹ °C بیش‌ترین مقدار را دارا بود.

۹- در کلیه‌ی آزمایش‌های انجام شده، بتن با دمای اولیه ۳۹°C ضعیف‌ترین نتایج را دارا بود لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که دماهای اولیه‌ی حدود۴۰°C و بالاتر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کیفیت بتن را کاهش می‌دهند.

۱۰- با توجه به ویژگی‌ها و شرایط حاکم بر این تحقیق و در محدوده‌ی دمایی برای دمای اولیه‌ی بتن در این تحقیق، به نظر می‌رسد که دمای اولیه‌ی ۲۵ °C منجر به به‌ترین کیفیت در بتن می‌گردد.

۱۱- از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که دمای بتن در هنگام ریختن، پارامتر تأثیرگذاری بر ویژگی‌های مقاومتی و دوامی بتن‌های بدون اسلامپ می‌باشد.

مراجع

۱. نویل، ای.ام.،« بتن‌شناسی (خواص بتن)» ، ترجمه هرمز فامیلی، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۶۸).

۲. مهتا، پ.ک. و مونته‌ئیرو، پ. ج. م، «ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)» ، ترجمه علی‌اکبر رمضانیان‌پور، پرویز قدوسی و اسماعیل گنجیان، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۳).

3. Klieger, P., "Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength", *Journal of the American Concrete Institute*, June, Vol. 54, pp. 1063-81, (1958).

4. Burg, R.G. "The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete", Research and Development Bulletin RD113, Portland Cement Association, (1996).

5. Mouret, M., Bascoul, A. and Escadeillas, G. "Microstructural Features of Concrete in Relation to Initial Temperature – SEM and ESEM Characterization", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 369-375, (1999).

۶. حاجی تقی تهرانی، پویا، «بررسی تأثیرات دمای اولیه‌ی بتن بر برخی پارامترهای دوامی آن در مورد جداول بتنی تهیه شده به‌روش سنتی»، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۷).

7. ACI 211.3R-02, "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete",Reported by ACI Committee 211, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2006).

8. ASTM C 1176-92, "Standard Practice for Making Roller- Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table", ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, (2006).

9. ASTM C 1170-91, "Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller–Compacted Concrete Using a Vibrating Table", ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, (2006).

10. ACI 207.5R-99, "Roller–Compacted Mass Concrete ", Reported by ACI Committee 207, *ACI Manual of concrete Practice*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2006).

11. CSA A23.2-12C, "Making, Curing and Testing Compression Test Specimens of No-Slump Concrete", Canadian Standards Association, Ontario, (1994).
12. ASTM C 138/C 138M-01a," Standard Test Method for Density (Unit Weight),Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, (2006).
13. BS EN 12350-3, "Testing Fresh Concrete – Part 3: Vebe Test", British Standards Institution, London, (2000).
۱٤. تدین،م. ،رضایی،ف. و نصرآزادانی،س.م.،« مشخصات فنی، راهنمای تولید وپذیرش جداول بتنی پیش ساخته»،تهران، سازمان مهندسی وعمران شهر تهران، (۱۳۸۸).
15. BS EN 1340, "Concrete kerb units–Requirements and test methods", British Standards Institution, London, (2003).